सिलिकॉन नाइट्राइड में क्वांटम प्रकाश: परमाणु-दोष की संभावित भूमिका

विज्ञान एवं प्रौद्योगिकी (मुख्य परीक्षा: सामान्य अध्ययन-III) | शोध की तारीख: 23 मार्च 2026 | प्रकाशित: 24 अक्टूबर 2026

खबरों में क्यों

भारतीय विज्ञान संस्थान के शिबु मेहेर, मनोज डे और अभिषेक कुमार सिंह ने सिलिकॉन नाइट्राइड में चमकीले क्वांटम उत्सर्जन के संभावित परमाणु-स्तरीय स्रोत का अध्ययन किया है। शोधपत्र नैनो लेटर्स में 23 मार्च 2026 को प्रकाशित हुआ। पत्रिका और क्रॉसरेफ, दोनों इस ऑनलाइन प्रकाशन तारीख की पुष्टि करते हैं। संस्थागत विवरण ने इसके एकीकृत क्वांटम फोटोनिक्स संबंधी महत्व को समझाया।

उपयोगी प्रकाश देने वाले परमाणु-दोष की परिकल्पना

किसी पदार्थ में दोष हमेशा नुकसान नहीं होता। परमाणु की जगह बदलने या किसी जगह के खाली रहने से ऐसे स्थानीय केंद्र बन सकते हैं जो उपयोगी प्रकाश उत्सर्जित करें। आईआईएससी का नया सैद्धांतिक अध्ययन सिलिकॉन नाइट्राइड में दिखे एकल-फोटॉन उत्सर्जन की ऐसी ही संभावित व्याख्या देता है। यह अभी सभी वास्तविक नमूनों में दोष की अंतिम पहचान का प्रमाण नहीं है।

शोध में मिश्रित घनत्व फलन सिद्धांत से इलेक्ट्रॉनिक तथा प्रकाशीय गुण निकाले गए। मुख्य प्रस्ताव है कि नाइट्रोजन से जुड़ा ऋणावेशित प्रतिस्थान-दोष और रिक्ति का संयुक्त केंद्र पहले देखे गए दृश्य प्रकाश उत्सर्जन की संभावित व्याख्या कर सकता है। अध्ययन में नया वाणिज्यिक क्वांटम उपकरण या संचार नेटवर्क बनाकर उसका परीक्षण नहीं किया गया।

एकल-फोटॉन स्रोत की जरूरत

फोटॉन प्रकाश का क्वांटम है। एकल-फोटॉन स्रोतों से जुड़ी तकनीकें प्रकाश को बहुत सूक्ष्म स्तर पर तैयार करने और नियंत्रित करने का प्रयास करती हैं। ऐसे स्रोत क्वांटम संचार, संवेदन और सूचना प्रसंस्करण के लिए उपयोगी हो सकते हैं। स्रोत का चमकीला होना पर्याप्त नहीं; उत्सर्जन की प्रकृति, स्थिरता और उसे प्रकाशीय परिपथ से जोड़ने की क्षमता भी महत्वपूर्ण है।

पहले के प्रयोगों में सिलिकॉन नाइट्राइड से संबंधित नमूनों में कमरे के तापमान पर एकल-फोटॉन उत्सर्जन देखा गया था। इसलिए वर्तमान अध्ययन को पहली बार ऐसा प्रकाश बनाने का दावा नहीं समझना चाहिए। इसका अलग प्रश्न है: देखे गए प्रकाश के पीछे कौन-सा सूक्ष्म परमाणु विन्यास हो सकता है? प्रयोग में संकेत देखना और उसके कारण की पहचान करना अलग वैज्ञानिक उपलब्धियां हैं।

PCSMANTRA.COM

सिलिकॉन नाइट्राइड और परमाणु-दोष

सिलिकॉन नाइट्राइड एकीकृत प्रकाशिकी के लिए उपयोगी मंच माना जाता है। शोध का विचार यह है कि प्रकाश का स्रोत और उसे ले जाने वाली संरचनाएं एक ही सामग्री-मंच में उपलब्ध हों तो अलग पदार्थों को जोड़ने की कुछ कठिनाइयां घट सकती हैं। लेकिन इस संभावना को तैयार, बड़े पैमाने पर निर्मित क्वांटम चिप के बराबर नहीं रखना चाहिए।

अध्ययन में क्रिस्टलीय बीटा-सिलिकॉन नाइट्राइड के दोषों का मॉडल बनाया गया। रिक्ति का अर्थ है नियमित जालक की किसी जगह पर अपेक्षित परमाणु का न होना। प्रतिस्थान-दोष में एक परमाणु दूसरे प्रकार के परमाणु की जगह पर रहता है। प्रस्तावित संयुक्त केंद्र में सिलिकॉन की जगह नाइट्रोजन है और उसके पास नाइट्रोजन की रिक्ति है। इसकी ऋणावेशित अवस्था पर विशेष ध्यान दिया गया।

गणना कैसे की गई

लेखकों ने 280 परमाणुओं वाली पुनरावृत्त संरचना में दोषों के गुणों की गणना की। उन्होंने अलग विन्यासों की स्थिरता, इलेक्ट्रॉनिक अवस्थाएं, उत्सर्जन ऊर्जा तथा इलेक्ट्रॉन और जालक कंपन के संबंध का विश्लेषण किया। यह परमाणु-स्तरीय संगणकीय मॉडल है, 280 अलग प्रायोगिक नमूनों का सर्वेक्षण नहीं।

मॉडल की उपयोगिता इस बात में है कि वह प्रकाशीय संकेत को एक विशिष्ट संरचना से जोड़कर जांचने योग्य प्रस्ताव देता है। इसकी सीमा भी स्पष्ट है: आदर्श क्रिस्टलीय संरचना वास्तविक पतली फिल्मों के हर स्थानीय परिवेश का प्रतिनिधित्व नहीं करती। सतह, अंतरफलक, तनाव तथा अन्य दोष वास्तविक उत्सर्जन को प्रभावित कर सकते हैं। इसलिए गणना और प्रयोग का मेल समानता का प्रमाण हो सकता है, अनिवार्य रूप से अद्वितीय पहचान का नहीं।

संरचना बदलने पर प्रकाश क्यों बदला

एक शुरुआती विन्यास के लिए गणना में लगभग 2.46 इलेक्ट्रॉन-वोल्ट की शून्य-फोनॉन रेखा और लगभग 9.01 नैनोसेकंड का विकिरणीय जीवनकाल मिला। लेकिन उस विन्यास में अस्थिरता का संकेत भी था। परमाणुओं के थोड़ा खिसकने से कम सममिति वाले दो समान-ऊर्जा विन्यास बन सकते हैं। लेखकों ने इसे छद्म यान-टेलर विकृति से जोड़ा।

विकृत विन्यास में उत्सर्जन ऊर्जा लगभग 1.80 इलेक्ट्रॉन-वोल्ट और विकिरणीय जीवनकाल लगभग 10.17 नैनोसेकंड निकला। दोनों संख्याओं के समूह अलग संरचनाओं के लिए हैं; उन्हें मिलाकर एक ही अपरिवर्तनीय केंद्र का गुण नहीं बताना चाहिए। विकिरणीय जीवनकाल प्रकाश उत्सर्जन की प्रक्रिया से जुड़ा है। यह उपकरण कितने वर्ष चलेगा या क्वांटम सूचना कितनी देर सुरक्षित रहेगी, उसका माप नहीं है।

शून्य-फोनॉन रेखा और डेबाई-वॉलर कारक

ठोस में इलेक्ट्रॉनिक परिवर्तन के साथ जालक कंपन भी जुड़ सकते हैं। फोनॉन इन कंपन का क्वांटम वर्णन है। शून्य-फोनॉन रेखा उस प्रकाशीय परिवर्तन से जुड़ी होती है जिसमें फोनॉन की शुद्ध भागीदारी नहीं होती। अन्य संबंधित उत्सर्जन पार्श्वपट्टियों में दिखाई दे सकता है। क्वांटम प्रकाशिकी के लिए तेज और स्पष्ट रेखा में पर्याप्त उत्सर्जन उपयोगी हो सकता है।

डेबाई-वॉलर कारक शून्य-फोनॉन रेखा के हिस्से को समझने का संकेतक है। अध्ययन में शुरुआती विन्यास के लिए लगभग 33 प्रतिशत और विकृत विन्यास के लिए लगभग 41 प्रतिशत निकला। इसे कुल बिजली से प्रकाश बनाने की दक्षता, एकल-फोटॉन शुद्धता या उपकरण की सफलता दर नहीं कहना चाहिए। ये अलग गुण हैं और उनके लिए अलग मापन चाहिए।

41 प्रतिशत को सावधानी से क्यों पढ़ें

यह आंकड़ा गणना से निकला है, नए बनाए उपकरण पर मापा गया सार्वभौमिक मान नहीं। लेखकों ने यह भी बताया कि प्रयुक्त संरचनात्मक गणना कुछ विस्थापनों को कम आंक सकती है। इससे इलेक्ट्रॉन-फोनॉन युग्मन के अनुमान पर असर और डेबाई-वॉलर कारक के अधिक आंके जाने की संभावना बनती है। इसलिए लगभग 41 प्रतिशत को सुनिश्चित न्यूनतम प्रदर्शन नहीं माना जा सकता।

पहले के अलग प्रयोगों के जीवनकाल और उत्सर्जन ऊर्जा में भी अंतर हैं। अध्ययन की गणना इन संकेतों के लिए एक संभावित परिवार प्रस्तुत करती है; हर प्रायोगिक संख्या से पूर्ण समानता का दावा उचित नहीं। किसी एक गुण का अच्छा मेल दूसरे सभी गुणों की पुष्टि नहीं करता। सामग्री की पहचान के लिए नियंत्रित निर्माण और लक्षित प्रकाशीय परीक्षण महत्वपूर्ण बने रहते हैं।

PCSMANTRA.COM

वैकल्पिक व्याख्या और वास्तविक सीमा

पूर्व अध्ययनों में समान तरह से तैयार नमूनों के उत्सर्जन को लेकर अलग व्याख्याएं रही हैं। कुछ संकेत सिलिका आधार-सामग्री के दोषों से जोड़े गए थे। वर्तमान लेखक नाइट्राइड के नाइट्रोजन-संबंधी केंद्रों की व्याख्या का समर्थन करते हैं, पर स्वयं आगे नियंत्रित संश्लेषण तथा लक्षित प्रयोगों की जरूरत बताते हैं। इसलिए विवाद को हमेशा के लिए समाप्त हुआ नहीं बताना चाहिए।

दोष का संभावित स्रोत समझना उसे इच्छित स्थान और संख्या में विश्वसनीय ढंग से बनाना नहीं है। नियंत्रित निर्माण, आवेश अवस्था की स्थिरता, परिपथ से संयोजन तथा अलग स्रोतों के प्रकाश का आपसी मेल आगे की चुनौतियां हैं। यह अध्ययन उन चुनौतियों को दिशा देता है, उनके पूरे समाधान का प्रदर्शन नहीं करता।

यहां हीरे के प्रसिद्ध नाइट्रोजन-रिक्ति केंद्र से नाम की समानता भ्रम पैदा कर सकती है। हीरे में नाइट्रोजन बाहरी प्रतिस्थापित परमाणु होता है और पड़ोस में कार्बन की रिक्ति होती है। वर्तमान प्रस्ताव में नाइट्रोजन उसी पदार्थ के घटकों में से है, लेकिन सिलिकॉन की जगह बैठा है। इसलिए अलग मेजबान पदार्थों के समान संक्षिप्त नाम को एक जैसी संरचना का प्रमाण नहीं मानना चाहिए।

मुख्य परीक्षा में वैज्ञानिक महत्व

इस उदाहरण को क्वांटम प्रौद्योगिकी और पदार्थ-विज्ञान के संबंध से समझा जा सकता है। नई क्षमता केवल दोषरहित सामग्री बनाने से नहीं आती; कभी नियंत्रित दोष उपयोगी कार्य करते हैं। समस्या देखे गए प्रकाश की सूक्ष्म उत्पत्ति है। विधि परमाणु-स्तरीय गणना है। परिणाम एक जांचने योग्य दोष-परिवार और उसके अनुमानित प्रकाशीय गुण हैं।

उत्तर में सिद्धांत, प्रयोग और उपकरण-विकास को अलग रखें। वैज्ञानिक मॉडल उपयोगी परिकल्पना दे सकता है, लेकिन वास्तविक उपकरण की विश्वसनीयता के लिए स्वतंत्र परीक्षण चाहिए। प्रकाशिकी, सामग्री निर्माण और संगणकीय विज्ञान का सहयोग यहां महत्वपूर्ण है। यह सामान्य विश्लेषण है, किसी नई सरकारी योजना या तत्काल राष्ट्रीय क्वांटम नेटवर्क की घोषणा नहीं।

नीतिगत दृष्टि से यह बुनियादी शोध के महत्व को भी समझाता है। किसी तैयार उत्पाद से पहले उसके घटक का काम करने का कारण समझना पड़ता है। संगणकीय संसाधन ऐसी परिकल्पनाएं जांचने में मदद करते हैं, जबकि निर्माण सुविधाएं और सटीक मापन उन्हें चुनौती दे सकते हैं। दोनों की भूमिकाएं पूरक हैं। केवल आकर्षक अनुप्रयोग का उल्लेख तकनीकी तैयारी के स्तर का प्रमाण नहीं होता।

आगे क्या देखना होगा?

अगला महत्वपूर्ण कदम प्रस्तावित दोष को नियंत्रित तरीके से बनाकर उसके प्रकाशीय हस्ताक्षरों की जांच करना होगा। नाइट्राइड और सिलिका की संभावित भूमिकाएं अलग करने वाले परीक्षण विशेष उपयोगी होंगे। अलग स्थानीय तनाव तथा संरचनाओं के साथ उत्सर्जन कितना बदलता है, यह भी देखना होगा।

उपकरण की ओर बढ़ते समय केवल चमक नहीं, उत्सर्जन की शुद्धता, स्थिरता, निर्माण की पुनरुत्पादकता और परिपथ से संयोजन भी साथ जांचने होंगे। अभी उपलब्धि एक संभावित परमाणु-स्तरीय व्याख्या है। इसका महत्व भविष्य के प्रयोगों को अधिक लक्षित बनाना है, सिद्धांत के आंकड़ों को तैयार व्यावसायिक प्रदर्शन मान लेना नहीं।

अभ्यास प्रश्न: नियंत्रित परमाणु-दोष क्वांटम प्रकाशिकी में कैसे उपयोगी हो सकते हैं? सिलिकॉन नाइट्राइड के उदाहरण से सैद्धांतिक व्याख्या, प्रायोगिक पहचान और उपकरण-विकास के बीच अंतर स्पष्ट कीजिए। (250 शब्द)

स्रोत: प्राथमिक शोध का सार। सार्वजनिक शोध संस्करण। आईआईएससी विवरण।

PCSMANTRA.COM